

Diseño y construcción de apuntalamiento innovador para la cúpula del santuario de Nuestra Señora de los Ángeles

Design and Construction of Innovative Reinforcements for the Dome of the Santuario de Nuestra Señora de los Ángeles

Agustín Hernández Hernández
Centro de Investigaciones en Arquitectura Urbanismo y Paisaje
Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México
ahh@unam.mx

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Resumen

El contenido del artículo se desarrolla en el ámbito del arte de la construcción con base en el apuntalamiento, un tema sustantivo en el quehacer de la restauración y profusamente empleado en varios procedimientos de construcción. Sin embargo, en este artículo se amplía el campo de lo posible, al aplicar una teoría denominada "estructuras resistentes por forma" que, en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, tiene una importante tradición. Su historia se fortaleció desde los cuarenta, con las clases que impartieron los arquitectos Félix Candela Outeriño, Fernando López Carmona y Juan Antonio Tonda Magallón, las cuales se glorificaron mediante la construcción de las cubiertas resueltas con cascarones de concreto.

Ahora se comparte una experiencia donde se retoman los fundamentos de dicha teoría práctica, explicando a detalle cómo resulta posible reinterpretar aquella tradición constructiva para diseñar un sencillo y elegante apuntalamiento resistente por forma como una opción razonable, adecuado a la magnitud de las dimensiones de la Iglesia de Nuestra Señora de los Ángeles, uno de los santuarios más venerados de la Ciudad de México, el cual, debido a los terremotos de 2017, entró en crisis y se vio amenazado en ser derribado, dada la magnitud del daño sufrido.

Palabras Clave: compresión, cuádrlica, bóveda, estabilidad, estereotomía, fragilidad, generatriz, hiperboloide, holgura, invasivo, izar, largueros, linternilla, lucarnas, mampostería, marquesina, mediooctaedro, plemento, toral, triditrabe

Abstract

This article is centered on reinforcement, a substantive issue in restoration work and one that is widely used in various construction procedures. It focuses on

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2021
Fecha de aceptación: 14 de junio de 2021

<https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2021.23.80167>

the field of the possible, applying the theory of “form-resistant structures,” which has a long history at the unam’s School of Architecture going back to the forties, when it was taught by the architects Félix Candela Outeriño, Fernando López Carmona and Juan Antonio Tonda Magallón, who glorified the construction of concrete shell roofing.

This article shares an experience based on the foundations of this practical theory, explaining in detail how it is possible to reinvent this construction tradition to design a simple, elegant form-resistant reinforcement as a sustainable option, appropriate for the dimensions of the Santuario de Nuestra Señora de los Ángeles, one of the most revered churches in Mexico City, which was heavily damaged in the 2017 earthquake and threatened with demolition.

Keywords: *Compression, quadric, vault, stability, stereotomy, fragility, generatrix, hyperboloid, space, invasive, elevation, crossbeams, roof lantern, dormers, masonry, canopy, hemi-octahedron, ribbed vault, central structure, tridilosa*

Presentación

El santuario de Nuestra Señora de los Ángeles tiene una multitud de devotos de varias partes de México; su construcción se realizó por etapas, la final ocurrió entre 1885 y 1890, cuando el Arq. Emilio Dondé Preciat se enfrentó al difícil problema de adaptar una estructura existente para construir la audaz cúpula resistente por forma, diseñada con mampostería de tezontle y cuyo peso propio es de aproximadamente 521 toneladas, que se transmiten hacia el interior por medio de arcos y pilares de cantera que adaptó para complementar la estructura interior.

El templo de Nuestra Señora de los Ángeles, situado en la colonia Guerrero de la Ciudad de México, es un monumento “de buena arquitectura”. Los violentos terremotos de 2017 motivaron el colapso de la zona sur de la cúpula central y, a partir de ese momento, la problemática del apuntalamiento para contener el segmento que quedó en el espacio se situó a 27.72 metros de altura.

Las repercusiones de ese suceso trastocaron al monumento, transformándolo en un estado de precariedad, lo que generó incertidumbre en el medio profesional sobre cómo proceder a restaurarla o demolerla por completo. Como arquitecto, desde el primer momento defendí la tesis de conservarla, porque “no todo está perdido”, aunque eso significaba un gran desafío, en contraste con la demolición, que es un camino más fácil, sin exigencias técnicas.

Fue así como surgió un gran reto generalizado, porque ante la latente decisión de demolerla, nada podía salir mal. Es decir que, desde ese momento, hasta para realizar los primeros registros, en el equipo de trabajo teníamos que tomar todas las precauciones a nuestro alcance.

La investigación desarrollada durante la comprensión de la forma construida permitió comprobar que la cúpula sí tiene un tambor vertical de 3.71 m de altura, bien integrado compositivamente al diseño de la morfología, cuya composición tiene la cualidad de sorprender, porque aún para varios profesionales este detalle pasa desapercibido y creen que dicha cúpula histórica carece de tambor.

Hasta 2019, el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) emitió intenciones más claras para intervenir dicha cúpula; entonces, el reto volvió a adquirir vigencia, por lo que se reflexionó una vez más sobre la tesis inicial, calcular y recalcular el diseño de cada elemento, porque como sabemos los números, aunque contengan todos sus decimales, brindan resultados cuantitativos pero hipotéticos y la verdadera prueba es el resultado que se consigue en la realidad.

Proceso de diseño

Antes de empezar a describir el proceso empleado para crear la propuesta de apuntalamiento, es importante señalar algunas características relevantes tomadas en cuenta durante esta etapa conceptual. La superficie del casquete esférico que se pretende contener está aproximadamente a 27.77 metros de altura respecto al nivel de feligresía, y la magnitud de la carga a contener es de 317.81 toneladas.

Por lo anterior, diseñar un apuntalamiento convencional apoyado totalmente desde el nivel de feligresía resultaría muy costoso e invasivo. Ante dicha situación, se estudió la posibilidad de poder apoyarse en las enjutas del sistema abovedado, de manera que las cargas del apuntalamiento se transmitieran directamente a los muros de mampostería de tezontle.

Ante ello, es importante señalar que la práctica de la construcción se asocia al lugar y al tiempo en que se produce, y ese momento presentó retos con problemas sin precedentes de carácter técnico, económico y funcional, los cuales, en nuestro caso, se trataron de resolver del mejor modo posible. Así, se diseñó un apuntalamiento que garantizara la estabilidad de la cúpula en condición de riesgo para poder restaurarla sin causarle daños adicionales, por lo que dicha estructura piadosa debía realizarse a conciencia y con el máximo cuidado.

A manera de reflexión, cabe señalar que, ante tan importante misión, con frecuencia los apuntalamientos son improvisados y se confían a los trabajadores de obra o también se construyen con criterios que ofrecen los negocios dedicados a vender o rentar sistemas comerciales.

Las premisas de diseño surgieron durante el mes de mayo de 2019, cuando la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del INAH me invitó a participar como especialista mexicano en la Misión de Cooperación Técnica México-Francia. En esa ocasión, al inspeccionar algunas estructuras dañadas por los sismos en los estados de Morelos y Puebla, aparecieron varios conventos con apuntalamientos excepcionalmente densos; entonces me pregunté con qué herramienta técnica fueron diseñados e inmediatamente reflexioné sobre lo invasivo y costoso de esa renta.

Dicha problemática real exige una respuesta desde la actividad proyectual de la arquitectura, donde se aproveche la percepción del contorno donde se actúa. Después, cuando se presentó la posibilidad formal de diseñar el apuntalamiento para estabilizar la cúpula del santuario de Nuestra Señora de los Ángeles, ya se tenía el planteamiento del problema, el cual garantizó tener muy claro lo que buscaba el proyecto, es decir, que el diseño empezó con formular el concepto general, luego apareció la geometría como medio para analizar e ilustrar lo que imaginamos.

Ante dicha situación, se consideró relevante analizar con profundo respeto el sector existente de la cúpula por su valor histórico, por lo que se midió cada elemento hasta donde fue posible, debido a la situación de riesgo. En principio resultó imposible realizar cálculos exactos de estereotomía. Sin embargo, ante esta complejidad se optó por calcular fragmentos simples sin perder la visión del conjunto.

De esta manera fue posible integrar la información suficiente para empezar a diseñar un apuntalamiento digno de dicho templo, donde se contemplaron argumentos de carácter técnico, económico y funcional, en contraste al típico apuntalamiento usado habitualmente en varios procesos de intervención, sin el menor intento de llegar al virtuosismo.

Así, pues, el proceso consiste en hacer comprobaciones analíticas desde que se crean los primeros trazos, como parte inicial del análisis geométrico; luego se complementa con un estudio detallado de fuerzas que solemos corroborar con experimentos de maquetas, para evaluar de manera desglosada los componentes principales y establecer un esquema estático constructivo eficaz, adecuado tanto a la proporción arquitectónica real, como a la intensidad de esfuerzos. De esta forma resulta práctico deducir oportunamente que cada posible solución posee sus propias características técnicas, constructivas y económicas.

Proceso de diseño. Fotografías: Ernesto Daniel Torres Esquivel (EDTE) y Rocío Esther Sampieri Castelán (RESC).



Como podemos inferir, la metodología aplicada es clásica y es una responsabilidad individual cuando alguien decide alejarse de ella. Lo único seguro es garantizar la comprensión estructural y constructiva, porque su incomprensión es una amenaza que puede conducir a soluciones arbitrarias. Cuando se emplea un proceso clásico, de manera gradual se adquiere todo el dominio que se requiere del tema, por ello varios arquitectos reconocen lo valioso de la geometría en la comprensión de la forma construida.

En varios proyectos especializados, lo que también se complica es la representación de los resultados, incluso en ocasiones tenemos que diseñar el contenido de los planos para que transmitan con claridad todo su contenido al momento de consultarse a pie de obra; en nuestro caso se hicieron 39 planos de 60 x 90 cm, para ilustrar varias peculiaridades, con su respectiva memoria de cálculo y cuyo contenido es fundamentalmente matemático; sin embargo, contiene todas las expresiones que permiten determinar cada elemento constructivo en verdadera forma y magnitud.

Por ejemplo, para diseñar el hiperboloide de revolución de un manto se recurrió a la teoría de las superficies cuádricas y, al cuantificar su momento de inercia con parámetros que resultaron de las proporciones de monumento, se obtuvieron diversos valores de diseño para determinar la expresión matemática en su forma general: $26.2813x^2 + 26.2813y^2 - 0.36z^2 = 9.461$, con la cual es posible determinar la familia de generatrices rectas tangentes a la superficie, asignando a la variable "y" de dicha ecuación un valor de 0.60 m.

Descripción de la composición

Desde un inicio el proyecto para apuntalar la zona de la cúpula se conceptualizó como un todo, respetuoso del comportamiento original de la estructura histórica, donde predominan esfuerzos de compresión. Ante esta circunstancia, se tomó la decisión de recurrir a la teoría de estructuras resistentes por forma, cuya eficacia continúa vigente, aunque dichas estructuras siguen caracterizándose como exigentes y rigurosas, porque su composición requiere de comprobaciones analíticas irrefutables.

Desde el exterior se puede visualizar que el templo tiene proporciones grandiosas, y al dimensionar el segmento de cúpula de 15 metros de diámetro, que aún permanece en el espacio, la magnitud de su daño resulta impactante para la gente que la observa desde la calle.

En general, el proyecto consiste en una combinación de superficies cuádricas y sólidos platónicos, donde cada composición se fundamenta en el rigor de la geometría como la vía segura para perfeccionar opciones que ofrecen las versiones de apuntalamiento convencional.

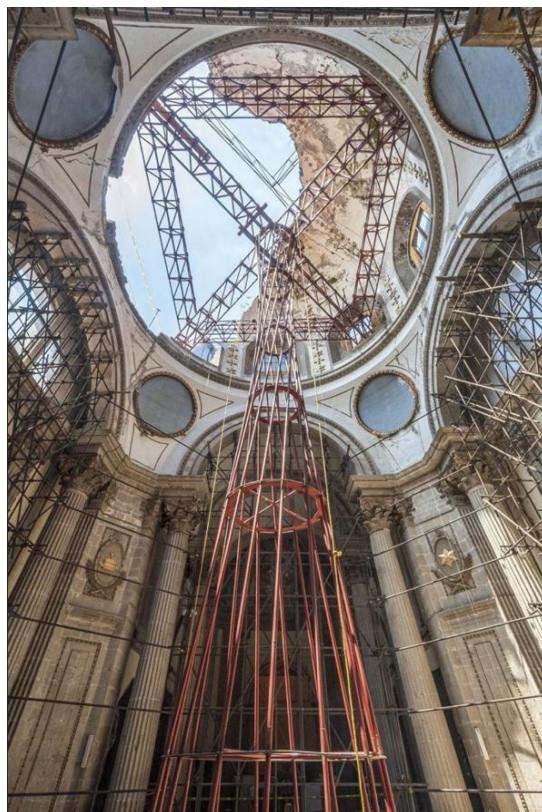
La idea de diseñar el hiperboloide de 21 m de altura, con una directriz circular de 1.2 m de diámetro, fue por la magnitud de las cargas a contener, ya que, de manera natural, posee una gran capacidad para soportar cargas a compresión y flexión. Aunado a estas virtudes es importante destacar su aspecto visual sencillo, que exhibe la correcta relación del material con la forma construida, al materializarse con una familia de generatrices rectas que gira alrededor de la circunferencia central, denominada directriz. Esa disposición sencilla proporciona un completo

efecto de armonía, donde no existen masas inertes, porque cada componente constituye una afirmación analítica.

Es importante señalar que la superficie del hiperboloide de un manto ha tenido pocas aplicaciones en la arquitectura, a pesar de poder configurarse mediante la traslación y la revolución. Durante la experiencia de los cascarones de concreto realizada por los ilustres maestros Candela, López Carmona y Tonda, cuyos proyectos fueron “geometrizados” con la superficie del paraboloides hiperbólico, que solo es de traslación.

El audaz hiperboloide, construido con 16 tubos de 2” de diámetro, de cédula 40 que pesa 1.863 toneladas, cumple dos propósitos fundamentales de diseño: como el primer elemento auxiliar para realizar el montaje y como último elemento a desmontar cuando se retire todo el apuntalamiento; en ambos casos funcionará como un confiable apoyo intermedio, con capacidad para soportar 77.216 toneladas. Asimismo, facilitará los trabajos de restauración, cuando sean autorizados.

La primera apuesta constructiva ocurrió precisamente con el hiperboloide metálico, debido a que, cuando se intentó construir en las coordenadas donde fue proyectado, el personal registró un constante desprendimiento de fragmentos áridos de la cúpula, lo que significaba un gran riesgo para los trabajadores. Entonces, debido a la falta de espacio para hacer maniobras dentro del predio, se tomó la decisión de prefabricarlo sobre el arroyo vehicular de la calle Lerdo y realizar la proeza de izarlo, sujetándolo del eje vertical mediante una grúa para encajarlo en su destino final.



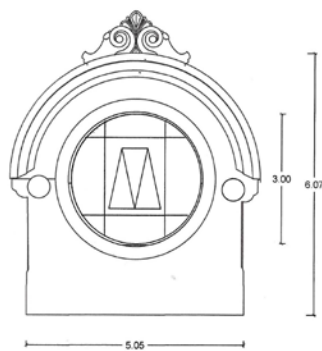
Izquierda, vista interior del elegante hiperboloide de un manto para funcionar como columna exenta, estabilizado por carga. Fotografía: EDTE y RESC.

Derecha, el apuntalamiento temporal se aleja de la lógica convencional, al observar las triditribes desde el interior que parece que flotan en el aire. Fotografía: EDTE y RESC.

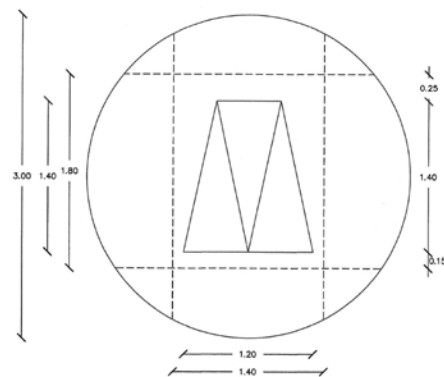
Dicho hiperboloide de doble curvatura inversa tiene una altura de 21 m y un diámetro en el desplate de 3.66 m. Al ser el primer componente que se izó, sirvió como ejercicio donde se empezaron a implementar las medidas de seguridad creadas inicialmente para las triditrabes y para familiarizarse con el nivel de riesgo con que se estaba trabajando. Afortunadamente, los trabajos se fueron desarrollando de manera exitosa, porque cualquier error podría significar una tragedia. Con un resultado óptimo, ahora desde el interior se observa que los rasgos estereométricos tanto de la cúpula como del exquisito hiperboloide que emerge del suelo sintonizan con la proporción del espacio.

La triditrabe se conforma por una serie sucesiva de pares de medioctaedros, cuya sección transversal tiene forma trapezoidal, la cual se diseñó para que pasen a través de la retícula metálica que quedó en las lucarnas, logrando una mínima holgura de 10 cm de magnitud entre triditrabe y la cancelería histórica de los vitrales.

Es importante comentar que las evidentes complejidades exigían una perfecta maniobra, dado el riesgo que valía la pena asumir, ya que durante la etapa de diseño se trabajó con algo de incertidumbre, porque había elementos en condición muy peligrosa para medirlos con exactitud. Sin embargo, mediante herramientas analíticas fue posible caracterizarlos con suficiente aproximación. Vale la pena comentar que en varios cálculos suelen preguntar cuál es el margen de error, en este caso fue menor a 10 cm.



FRAGMENTO DE TAMBOR CON GEOMETRÍA DE OCULO.



GEOMETRÍA DEL OCULO CON SECCIÓN DE TRIDITRABE MAS HOLGURAS O TOLERANCIAS RESPECTO A LA CANCELERÍA METÁLICA EXISTENTE

Izquierda, izado excepcionalmente espectacular de la triditrabe "a", el cual exigió un trabajo experto tanto del personal en tierra como de azotea. Fotografía: EDTE y RESC.

Derecha, esquemas extraídos de un plano ejecutivo, donde se ilustra la sección de la triditrabe en verdadera forma y magnitud con holgura. Elaboración: AHH.



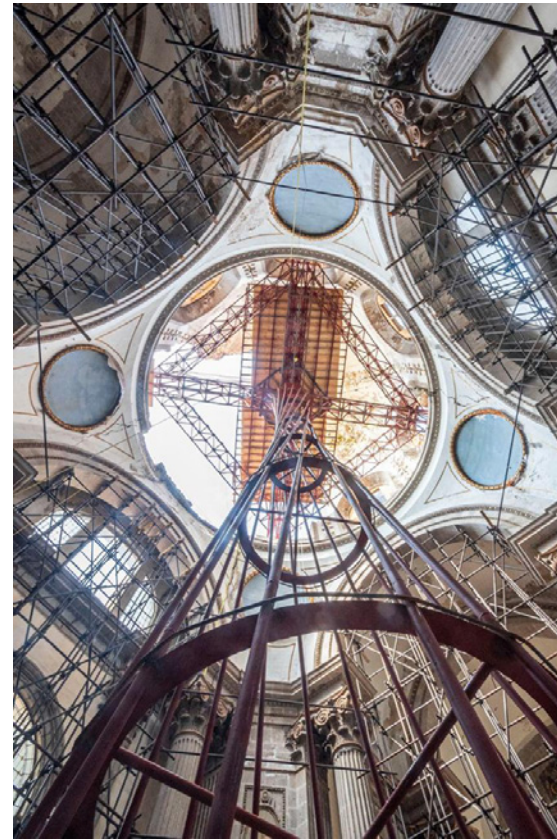
Ambas triditrabes principales tienen una longitud de 23 metros con un peralte de 1.4 m, que permite librar el tambor octagonal hasta apoyarse de manera articulada en las columnas de esquina dispuestas sobre las enjutas del sistema abovedado, para transmitir mediante las losas de reparto solo esfuerzos de compresión a los muros con una intensidad de 3 kg/cm^2 .

Asimismo, se recurrió a consultar las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, que en su capítulo núm. II, denominado "Evaluación y rehabilitación", indica que el apuntalamiento debe ser capaz de garantizar la estabilidad estructural, por lo que cada triditrabe, cuyo peso propio es de 4.101 toneladas, es capaz de soportar 52.75 toneladas.

Desde el punto de vista de la estabilidad estructural, podemos reflexionar que la realidad suele imponer retos difíciles de calcular y, ante proyectos de mucha exigencia, las teorías analíticas solo son efectivas para orientar de manera paulatina un conjunto de procesos que deben ser concebidos y analizados como un todo.

Después de izar ambas triditrabes principales se colocaron cuatro secundarias que entiban el sistema para rigidizar la plataforma de trabajo. También permitieron colocar el elemento denominado apoyo central, que impide que el casquete gire hacia el sur, el cual fue proporcionado para llegar hasta la zona del brocal de la linternilla y, debido a la curvatura exacta que exige el intradós del borde libre deformado, toma la geometría del plemento con tablonés de madera.

El proceso para diseñar las cerchas poligonales también registró complicaciones, a causa de que las deformaciones intrínsecas del segmento de cúpula difieren de cualquier superficie matemática reconocible. Ante esa condición, para su análisis se emplearon hipótesis



Izquierda, vista desde el nivel de feligresía de la plataforma de trabajo, que gravita sobre el sistema de triditrabes, donde se visualizan los rasgos estereométricos de la cúpula, con su sistema de apuntalamiento. Fotografía: EDTE y RESC.

Derecha, colocación de la triditrabe "b", en su destino final, sobre apoyos articulados para inhibir momentos y transmitir sus reacciones a las columnas de esquina. Fotografía: EDTE y RESC.

con varias series de mediciones realizadas de manera más creativa, por lo que se calcularon tres tipos de armaduras coplanares, estáticamente determinadas, visualizando siempre la máxima estabilidad del conjunto, para que cada elemento sea capaz de equilibrar los esfuerzos que fluyen en su interior.



Colocación del apoyo central que encaja sobre la tapa del hiperboloide, enrasada con la plataforma de triplay de $\frac{3}{4}$ de espesor. Fotografía: EDTE y RESC.



Proceso de colocación de las cerchas metálicas para tomar la curvatura de los plementos del casquete esférico del mejor modo posible. Fotografía: EDTE y RESC.



El borde libre que quedó de la zona del brocal de la linterna se recibe con polines de madera, para impedir una cadena de fallas. Fotografía: EDTE y RESC.

Finalmente, el proyecto se remata con una cubierta basada en la geometría de la bóveda de rincón de claustro, la cual trabaja a compresión y tiene la virtud de transmitir reacciones verticales en los apoyos.

Es importante comentar que el diseño, originalmente simple, se transformó en una geometría más compleja analíticamente, la cual exige mayor dominio geométrico y conocimiento sobre comportamiento de estructuras resistentes por forma, ya que aprovecha la disposición de las lucarnas para integrar las marquesinas en los lados de la bóveda de rincón de claustro. Así, el resultado formal mejoró notablemente, con la virtud de brindar iluminación y ventilación natural al interior de la plataforma de trabajo.

El análisis para deducir la sección variable se hizo por el método de doble integración numérica, considerando una carga de 150 kg/cm^2 ; después de aplicar el método de nodos, las solicitaciones de mayor intensidad resultaron en la cuerda superior, por ello, al momento de dimensionar cada elemento, se optó por una sección transversal de forma triangular para poder materializar la cuerda superior con dos tubos circulares y la inferior con uno.

Es importante comentar que la modulación para configurar la armadura poligonal se hizo con la elipse del intradós, cuya expresión matemática es $53.29x^2 + 88.36y^2 = 4708.7$. Con ella se calcularon los focos para poder trazar todas las líneas perpendiculares materializadas por los montantes.



Izquierda, izaje de los arcos torales para la cubierta temporal, derivada de una clásica bóveda de rincón de claustro; fue desarrollado de manera paulatina para evitar descompensaciones. Fotografía: EDTE y RESC.

Derecha, se aprecia la estabilidad de la bóveda de rincón de claustro con cuatro marquesinas bien definidas, apoyada en los extremos de las triditrabes. Fotografía: EDTE y RESC.



Cuando sea el momento de reconstruir la linternilla, se podrán liberar los plementos regulares contiguos a la zona de la clave polar, sin alterar la estabilidad de la cubierta que trabaja a esfuerzos de compresión. Fotografía: EDTE y RESC.

Regresando a nuestro propósito inicial, es imposible diseñar una cubierta de 23 metros de claro sin conocimiento de geometría y matemáticas clásicas, debido a que se trata de un diseño especial con una construcción audaz, donde fue necesario prefabricar los arcos torales de geometría elíptica en cuatro tramos para facilitar el montaje; su sección variable fue dictada por la variación de momentos e intensidad de los esfuerzos.

Dicha estructuración se complementa con la colocación de los largueros que recibieron a la lámina de zintro calibre 26 y los cuatro arcos de borde que dan forma a las marquesinas. La disposición concéntrica de los plementos de lámina fue diseñada para poder abrir la clave polar en el momento que se requiera reconstruir la linternilla, sin alterar la estabilidad del conjunto. Esto debido a que se estructura con dos arcos torales que transmiten las fuerzas a los arranques, situados en los extremos de las triditrabes, articuladas en las columnas de esquina que se apoyan sobre las enjutas de la bóveda tradicional de mampostería de tezontle.

Dado lo especializado del proyecto, durante esta etapa descriptiva resulta pertinente explicar que durante el diseño se planteó el procedimiento constructivo con el respectivo control para cada elemento y, por supuesto, los métodos de análisis estructural, los cuales deben ser coherentes con la técnica de construcción, porque el proyecto ejecutivo requiere especificaciones precisas como la estereotomía de cada elemento.

Maniobras de montaje

Desde el 2017 se identificó que el proyecto era sumamente delicado, debido a la progresiva inestabilidad de la cúpula, donde el paso del tiempo abrió más cada fractura al desintegrarse el mortero por el agua de lluvia, aunado a que la flora se multiplicó, incrementando la sensibilidad en la zona central, es decir que cualquier vibración adicional podría acabar en tragedia. Ese factor de riesgo siempre estuvo presente en la organización prevista para todas las maniobras de montaje.

Para planear el trabajo de campo, hubo varias reuniones tanto en la oficina de la maestra Virginia Arroyo Rodríguez como en el sitio con el ingeniero José Bermúdez Galán, quien fue el responsable de dirigir las maniobras. Ante las condiciones riesgosas del proceso constructivo, la mecánica consistió en transmitir de manera clara, mediante planos y maquetas, la lógica del proyecto para poder implementar decisiones rápidas, capaces de afrontar cualquier condición de peligro que frustrara al proyecto.

Durante el izaje fueron bien consideradas las premisas de diseño. El equipo, tanto de tierra como de azotea, estuvo a la altura de las circunstancias y con iniciativa pudo realizar cada maniobra con las máximas garantías. Es decir, implementaron su propia técnica de izaje para colocar cada elemento en la posición correspondiente y así todo fue progresando exitosamente acorde a la planeación.



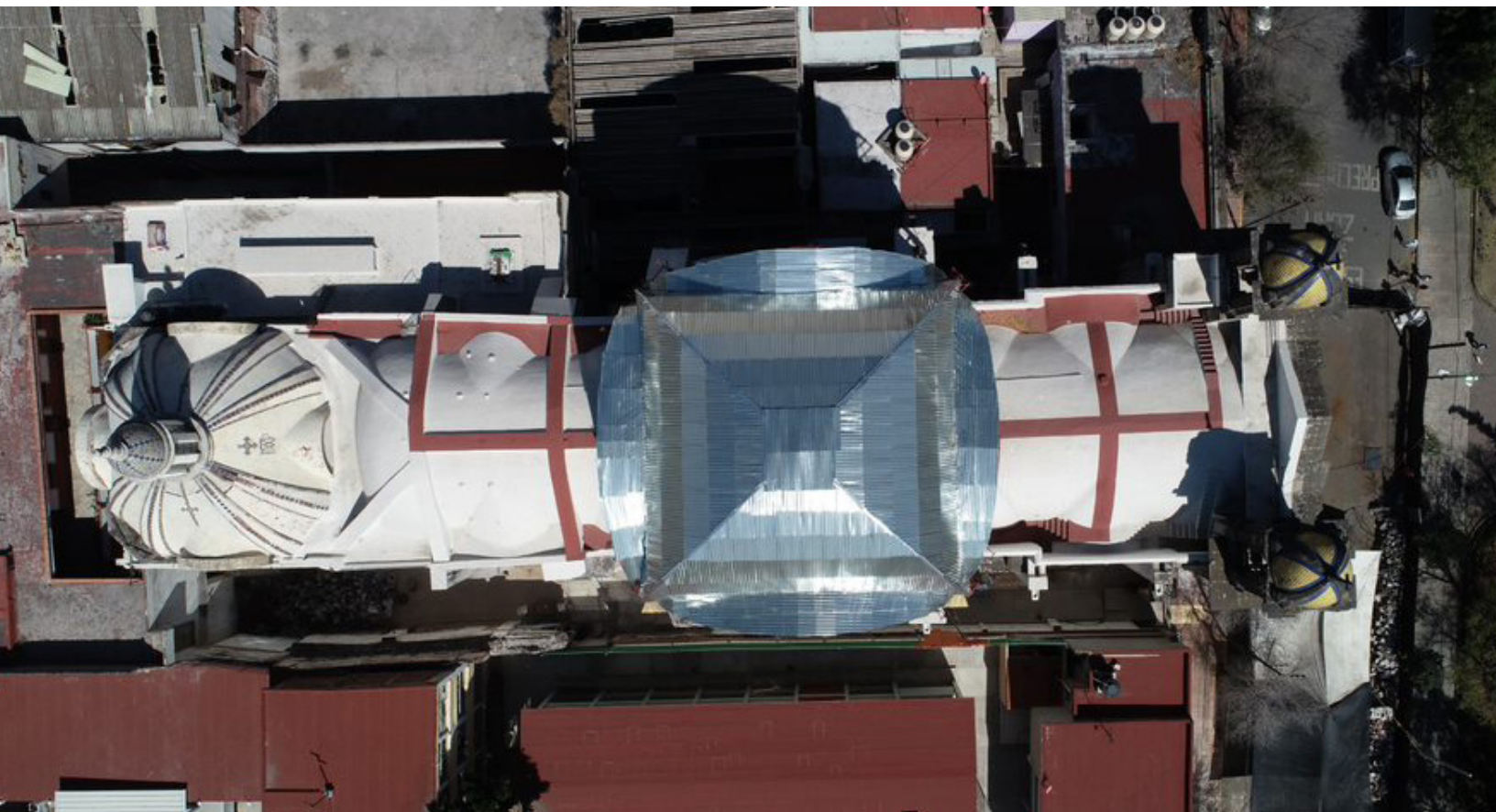
El exitoso proceso revela la magnitud del brazo de la poderosa grúa y representa las posibilidades que brinda la técnica constructiva del momento en que se produce. Fotografía: EDTE y RESC.

Ahora el proceso se describe emocionante, pero fueron varios días de inolvidable angustia. Elevar cada elemento a más de 25 metros de altura, luego realizar un traslado horizontal de aproximadamente 70 metros. Cada maniobra fue espectacular, generando entusiasmo en toda la gente de la colonia y emoción por esta evidente primera etapa de la intervención. Ahora, los colonos se sienten esperanzados en poder ver pronto la restauración de su santuario.

Fueron varios los factores que hacían delicado el montaje del apuntalamiento, por ejemplo, la fragilidad estructural, la diminuta holgura de 10 cm, la incertidumbre geométrica, la altura de 27.72 metros hasta la linternilla, las ráfagas de viento y la carencia de patio de maniobras, por lo que en esta etapa del proyecto, denominada “maniobras de montaje”, podemos reflexionar y reconocer el límite de la lógica, el cual te hace madurar más rápido, porque, aunque usemos varias decimales, eso resulta insuficiente para controlar la realidad y garantizar que el proyecto resulte exitoso.

Afortunadamente siempre existió fe y valor para seguir adelante, confiando primero en diversos cálculos clásicos, cuyas comprobaciones demostraban que estábamos en lo correcto. Ahora es fantástico verlo terminado, es un momento histórico donde fuimos afortunados de poder realizar este proyecto acorde a lo planeado.

La cubierta evita el deterioro progresivo de todo el crucero del santuario e incorpora iluminación y ventilación natural a la plataforma de trabajo; asimismo, facilitará la reconstrucción cuando el proyecto se apruebe. Fotografía: EDTE y RESC.



Conclusiones

Diseñar un apuntalamiento respetuoso de las características arquitectónicas del santuario de Nuestra Señora de los Ángeles significó todo un desafío. Sin embargo, la magnitud del reto se enfrentó como una oportunidad para ampliar el campo de lo posible. Por supuesto, exige cuantificar, pero lo más importante es cualificar primero lo general y luego visualizar los detalles.

Si se hubiese diseñado un apuntalamiento con la lógica tradicional de “resistencia por masa”, este conduciría a una estructura muy costosa e invasiva, por lo que se decidió crear un diseño “resistente por forma” para que, mediante la geometría, predominen esfuerzos directos de tracción o compresión y sea posible racionalizar material y espacio.

La composición resultó única, alejada de la lógica del apuntalamiento convencional, la cual se basa en investigaciones relacionadas estrictamente en la teoría de “resistencia por forma”, aplicadas al caso más complejo registrado en la Ciudad de México.

En el medio de la restauración, realizar montajes trasladando elementos prefabricados de estas dimensiones, mediante grúa, significa usar la tecnología avanzada del momento, que requiere una organización especial y permite identificar oportunamente cualquier irregularidad, porque debido a las complejas maniobras de izaje, cualquier error sería lamentable.

Difundir el fruto de una investigación asociada con la práctica profesional, relativa a los problemas que aquejan a los monumentos, para el Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP) resulta pertinente, porque comparte una actitud práctica para fortalecer y profundizar el conocimiento de frontera, donde cada demostración que se ofrece se despeja en el sentido de su objetividad para que al final se traduzca en una forma.

Para finalizar, es importante señalar que dicho trabajo aporta a nuestra percepción habitual, porque en varias ocasiones suele pensarse que la arquitectura inicia con la fachada. Sin embargo, esta puede surgir desde la cimentación; sin embargo, con esta enriquecedora experiencia se afirma que la actividad creativa en la restauración puede empezar con el apuntalamiento.

Referencias

- ARNAL Simón, Luis, y Betancourt Suárez Max. *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. México: Editorial Trillas, 2019.
- HERNÁNDEZ H., Agustín, y López Carmona, Fernando. *Proyecto de Corrección Geométrica Catedral y Sagrario Metropolitanos*. México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 2017.
- HERNÁNDEZ H. Agustín. “Criterios técnicos para conservar una cúpula en condición de riesgo dañada por impacto sísmico: El caso de Santa María de los Ángeles, Ciudad de México”, *OPUS Dipartimento di Architettura*, 4 (2020).
- GUZMÁN U., Xavier; Hernández H., Agustín; y San Martín C., Ivan. *Fernando López Carmona: 50 años de enseñanzas*. México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 2008.

Agustín Hernández Hernández

Centro de Investigaciones en Arquitectura Urbanismo y Paisaje
Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México
ahh@unam.mx

Investigador Titular del Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la Facultad de Arquitectura de la UNAM. En 1993 se incorporó a trabajar en el proyecto de corrección geométrica de la Catedral de México, en apoyo al desarrollo de las investigaciones encabezadas por el Dr. Fernando López Carmona, relativas a salvaguardar dicho monumento. Actualmente sus investigaciones se enfocan en la reestructuración de construcciones patrimoniales, aplicaciones del bambú como material estructural y sobre estructuras resistentes por forma.